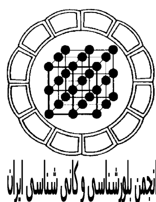
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی‌ام، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۷۵ تا ۸۸



ذخیره مس محدوده زمین‌حسین، کمربند فلززایی دهج - ساردوئیه، جنوب‌شرق ایران: ملاحظاتی روی کانه‌زایی، دگرسانی و میانبارهای سیال

محمد خالقی[۱]، علی عابدینی*[۱]، حجت اله رنجبر[۲]، علی اصغر کلاگری[۳]

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۸، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۵/۶)

چکیده: ذخیره مس زمین‌حسین به عنوان بخشی از کمربند فلززایی دهج - ساردوئیه، در ۱۷۰ کیلومتری جنوب‌شرق شهر کرمان واقع است. این ذخیره با سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت، آندزی‌بازالت و آذرآواری‌ها) و توده‌های نفوذی (گرانودیوریت و گرانیت) ائوسن میزبانی می‌شود. دگرسانی‌های پروپیلیتی، سریسیتی، رسی- سریسیتی و سیلیسی با این ذخیره در ارتباط هستند. کالکوپیریت و پیریت مهمترین کانی‌های سولفیدی درونزاد هستند که با انباشت‌های کانی‌های برونزاد چون گوتیت، هماتیت، لیمونیت، مالاکیت و آزوریت همراهی می‌شوند. کانی‌های درونزاد اغلب بافت‌های رگه-رگچه‌ای، داربستی و قشرگون را نشان می‌دهند. برپایه ریزدماسنجی در بلورهای کوارتز همزاد با کانه‌ها، چهار نوع میانبار سیال دو فاز غنی از مایع (L-V)، سه فازی مایع- گاز- جامد (L-V-S)، دو فازی غنی از گاز (V-L) و تک فازی گازی (V) بر اساس مقادیر فازی وجود دارند. نتایج ریزدماسنجی نشان می‌دهند که میانبارهای سیال دارای گستره دمای همگن‌شدگی گسترده‌ای (۱۷۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد) هستند. میانبارهای سیال نوع L-V-S دمای همگن شدگی و شوری به ترتیب ۴۷۳-۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۵/۶-۳۱/۴ درصد معادل وزنی نمک طعام دارند. میانبارهای دوفازی غنی از مایع (L-V) شوری‌هایی در گستره ۶/۴۵-۱/۷۴ درصد معادل وزنی نمک طعام را نشان می‌دهند. بر اساس یافته‌های ریزدماسنجی، جوشش، آمیختگی و سرد شدن ساده سیال‌ها، ساز و کارهای موثر در نهشت و گسترش این ذخیره بوده‌اند. سیال های کانسنگ‌ساز به احتمال بسیار خاستگاه ماگمایی و ماگمایی- جوی داشته‌اند. بر اساس ویژگی‌های بافتی و ساختی، انباشت‌های کانیایی دگرسانی و کانی‌زایی و داده‌های ریزدماسنجی، ذخیره زمین‌حسین می‌تواند در رده مس نوع پورفیری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: *دهج-ساردوئیه؛ کانه‌زایی؛ ذخیره زمین حسین؛ دگرسانی؛ میانبارهای سیال؛ مس پورفیری.*

مقدمه

کمربند فلززایی دهج-ساردوئیه بخش جنوبی کمربند ارومیه- دختر (شکل ۱ الف) [۱] و جزئی از کمربند مس ایران است. حضور سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ائوسن تا پلیوسن و کانی- زایی مس و مولیبدن پورفیری و رگه‌ای چندفلزی از مهمترین سیماهای زمین‌شناسی اقتصادی این کمربند محسوب می‌شوند (شکل ۱ب) [۲]. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (مجموعه‌های بحر آسمان و رازک) با میان‌لایه‌های رسوبی و سنگ‌های آتشفشانی الیگوسن (مجموعه هزار) به همراه سنگ‌های آذرین درونی ائوسن میانی تا الیگوسن- میوسن مهمترین واحدهای سنگی کمربند یاد شده هستند [۳، ۴]. سنگ‌های آذرین خروجی شامل بازالت، آندزیت، آندزی‌بازالت، تراکی‌آندزیت، داسیت و ریوداسیت و سنگ‌های آذرین درونی شامل گرانودیوریت، گرانیت، دیوریت و کوارتز دیوریت هستند.

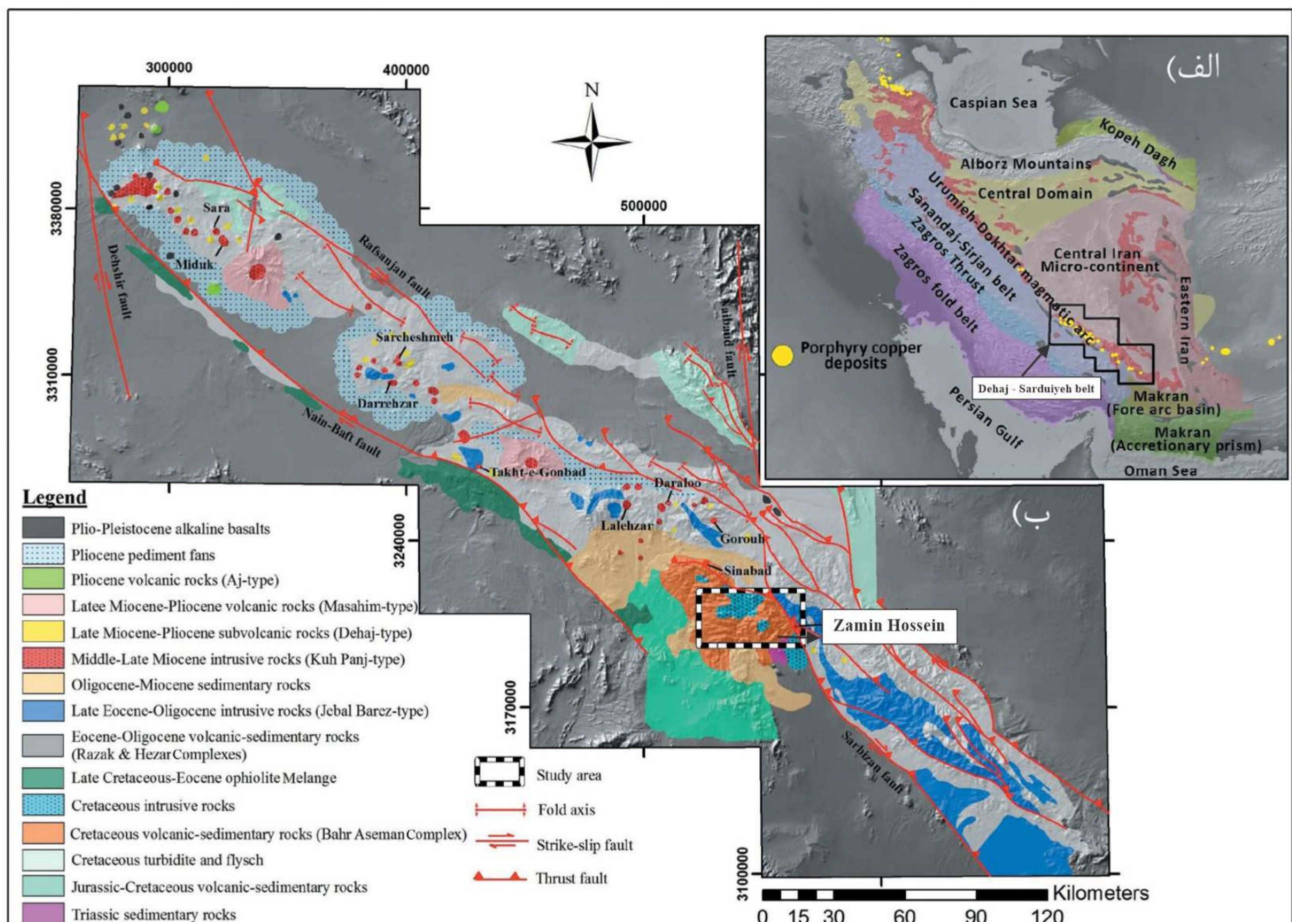
*نویسنده مسئول، تلفن: ۳۲۹۷۲۱۳۴ (۰۴۴)، نمابر: ۳۲۷۷۶۷۰۷ (۰۴۴)، پست الکترونیکی: abedini2020@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

دگرسانی‌های گرمابی سریسیتی، رسی، اپیدوتی و پروپیلیتی در این سنگ‌ها رخ داده است [۵، ۶]. وجود گوسان و پهنه‌های اکسیدی هماتیتی، گوتیتی، لیمونیتی و جاروسیتی از ویژگی-های بی مانند این کمربند فلززایی هستند [۷، ۸]. این کمربند میزبان ذخایر مس و مس- مولیبدن پورفیری چون میدوک شهربابک، سرچشمه رفسنجان [۹]، تخت‌گنبد سیرجان [۱۰، ۱۱] و دره آلو بردسیر-رابر [۱۲] است.

ذخیره زمین‌حسین از نشانه‌های معدنی شاخص مس در بخش مرکزی کمربند فلززایی دهج- ساردوئیه است (شکل ۱). این ذخیره در ۱۷۰ کیلومتری جنوب شهر کرمان و در ۹۰ کیلومتری شمال‌غرب شهرستان جیرفت واقع است. شکل‌گیری و تکامل سامانه گرمابی این ذخیره در ارتباط با جایگیری سنگ‌های آذرین درونی الیگوسن- میوسن در واحدهای سنگی قدیمی‌تر است. با وجود پژوهش‌های انجام شده پیرامون زمین-شناسی، دورسنجی [۱۳]، سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر خاکی نادر پهنه دگرسانی رسی [۱۴] منطقه زمین‌حسین، تاکنون بررسی دقیق و جامعی بر این منطقه از نظر زمین-شناسی اقتصادی انجام نشده است. در این پژوهش، براساس بازدیدهای صحرایی، سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و بررسی‌های میانبارهای سیال در بلورهای کوارتز همزمان تشکیل شده با کانی‌سازی سولفیدی، اطلاعات جامعی از روند کانه‌زایی، شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل و نوع ذخیره احتمالی ارائه شده است.



شکل ۱ (الف) پهنه‌های ساختاری ایران [۱] که در آن، موقعیت کمربند دهج- ساردوئیه (کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان، KCMA) و کمربند ماگمایی ارومیه-دختر نشان داده شده است. (ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده کمربند دهج- ساردوئیه که در آن موقعیت منطقه مورد بررسی و تعدادی از ذخایر مس پورفیری شناخته شده در ایران نمایش داده شده است (برگرفته از مرجع [۱۵] با کمی تغییرات).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

زمین‌شناسی

کمربند دهج- ساردوئیه در راستای کمربند ماگمایی ارومیه-دختر از شمال غرب استان کرمان شروع شده و با طول بیش از ۵۰۰ کیلومتر تا جنوب‌شرق این استان ادامه دارد. این کمربند ستبرایی حدود ۱۵ کیلومتر دارد و به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا بازی ائوسن و توده‌های آذرین درونی میوسن-پلیوسن تشکیل شده است [۱۵]. توده‌های آذرین درونی الیگومیوسن-پلیوسن در این کمربند به واحدهای آتشفشانی ائوسن هجوم برده و با گسترش سامانه‌های دگرسانی گسترده، با کانه‌زایی همراه شده‌اند. رسوب های کواترنری نیز پیرامون کمربند را پوشانده و درون بعضی از حوضه‌ها نهشته شده‌اند. مهم‌ترین واحدهای آتشفشانی این کمربند عبارتند از (الف) مجموعه آتشفشانی بحر آسمان با حدود ۷ هزار متر ستبرا به سن ائوسن پیشین- میانی و دربردارنده سنگ‌های آذرین و آذرآواری اسیدی در آغاز و ردیف‌های آذرآواری و آندزی- بازالتی در ادامه، (ب) مجموعه رازک به سن ائوسن میانی-پایانی و شامل سنگ‌های آذرین حدواسط و اسیدی و (پ) مجموعه آتشفشانی هزار به سن الیگوسن دارای فلدسپاتوئید فراوان با گرایش آهکی قلیایی ناشی از فعالیت ماگمایی زیر اشباع از سیلیس.

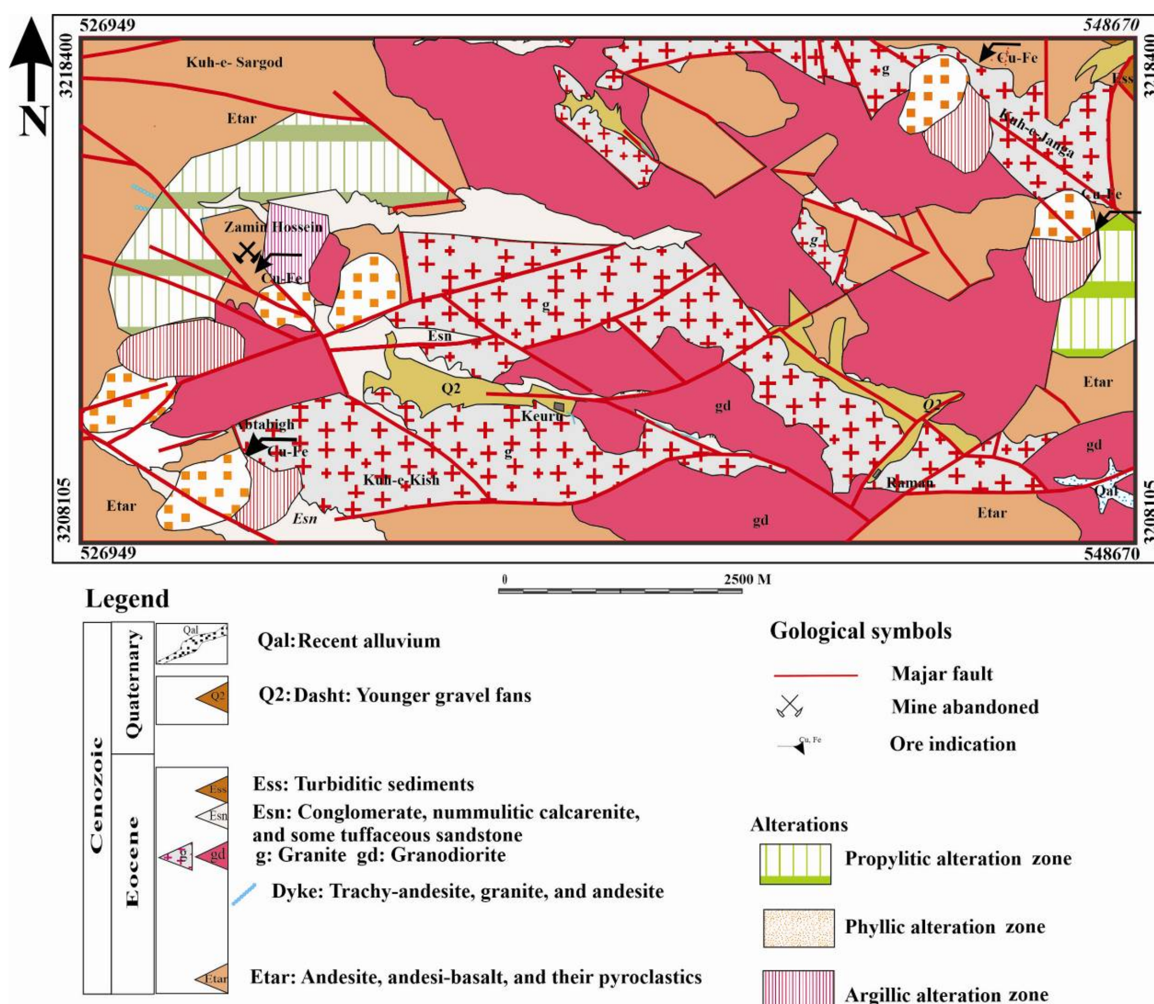
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که واحدهای زمین-شناسی منطقه زمین‌حسین را می‌توان از نظر سنی به دو زمان ائوسن و کواترنر تقسیم نمود (شکل ۲) [۱۵]. تشکیلات سنگی ائوسن در این منطقه را می‌توان به پنج واحد مجزاء تفکیک کرد که به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از (۱) سنگ‌های آذرین آتشفشانی (آندزیت، آندزی-بازالت و مواد آذرآواری)، (۲) دایک‌های تراکی‌آندزیتی، آندزیتی و گرانیتی، (۳) گرانیت و گرانودیوریت، (۴) کنگلومرا، کالکرینیت نومولیت‌دار و ماسه-سنگ توفی و (۵) رسوب های توربیدایتی. تشکیلات کواترنری منطقه نیز شامل دو واحد مخروط افکنه‌های گراول‌دار جوان و رسوب‌های آبرفتی عهد حاضر است (شکل ۲). در این منطقه، در نزدیکی برخوردگاه سنگ‌های آذرین گرانیتی و گرانودیوریتی با سنگ‌های آندزیتی، آندزی- بازالت و مواد آذرآواری و یا درون سنگ‌های آتشفشانی یاد شده فعالیت‌های ماگمایی همراه با رخداد سامانه‌های گرمابی ایجاد شده است. کانه‌زایی‌های رخ داده اغلب به صورت رگه‌ای و پراکنده دیده می‌شوند. بر اساس پیمایش‌های صحرایی و بررسی مغزه‌های حفاری در منطقه زمین‌حسین در لبه و مرز دو دگرسانی سریسیتی-رسی و پروپیلیتی با سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی، کانی‌سازی‌های گسترده‌ای از مس و آهن به صورت رگه-رگچه وجود دارد.

روش بررسی

این پژوهش، در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. در پیمایش‌های صحرایی، به منظور ارزیابی کلی و بررسی واحدهای سنگی منطقه و روابط آنها، از سنگ‌های آذرین درونی و آتشفشانی میزبان کانه‌زایی، رگه- رگچه‌های کانه‌زایی شده نمونه‌برداری و برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی و ارتباط آن‌ها با سنگ‌های آذرین آتشفشانی، تعداد ۱۰۰ نمونه سنگی (سطحی و عمقی) برداشت شد. از بین نمونه‌های برداشت شده، ۴۰ مقطع نازک و ۲۰ مقطع صیقلی تهیه شد و با میکروسکوپ نوری (عبوری- بازتابی) زایس مدل Axioplane در بخش زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان بررسی شدند. تعداد ۷ نمونه برای تعیین فازهای کانیایی پهنه‌های دگرسانی با پراش سنج پرتو X (XRD) فیلیپس مدل PW1800 با پرتوی Cu Kα، تک فاز ساز گرافیت ثابت شده، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت، جریان ۴۰ میلی آمپر، سرعت روبش ۲ درجه بر دقیقه در گستره ^{o}۷۰-۲=2θ در آزمایشگاه شرکت بینالود تجزیه شدند.

شش نمونه دوبرصیقل از کوارتزهای خودشکل، درشت بلور و شفاف همزاد با رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفید-اکسید برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی تهیه شدند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، تراشه‌های مناسب برای ریزدماسنجی انتخاب و اندازه‌گیری پارامترهای دمایی میانبارهای سیال با دستگاه سرمایش و گرمایش لینکام مدل THMS600 و میکروسکوپ نوری زایس در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. گستره دمایی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد بوده است. این دستگاه مجهز به دو کنترل‌گر گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)، مخزن ازت (برای انجماد) و مخزن آب (برای خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. واسنجی دستگاه طی گرمایش با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و طی انجماد با ماده استاندارد (ان- هگزان) با نقطه ذوب ۹۴٫۳- درجه سانتی‌گراد انجام شد. دقت دستگاه طی گرمایش و سرمایش به ترتیب ۰٫۶± و ۰٫۲± درجه سانتی‌گراد بود.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]



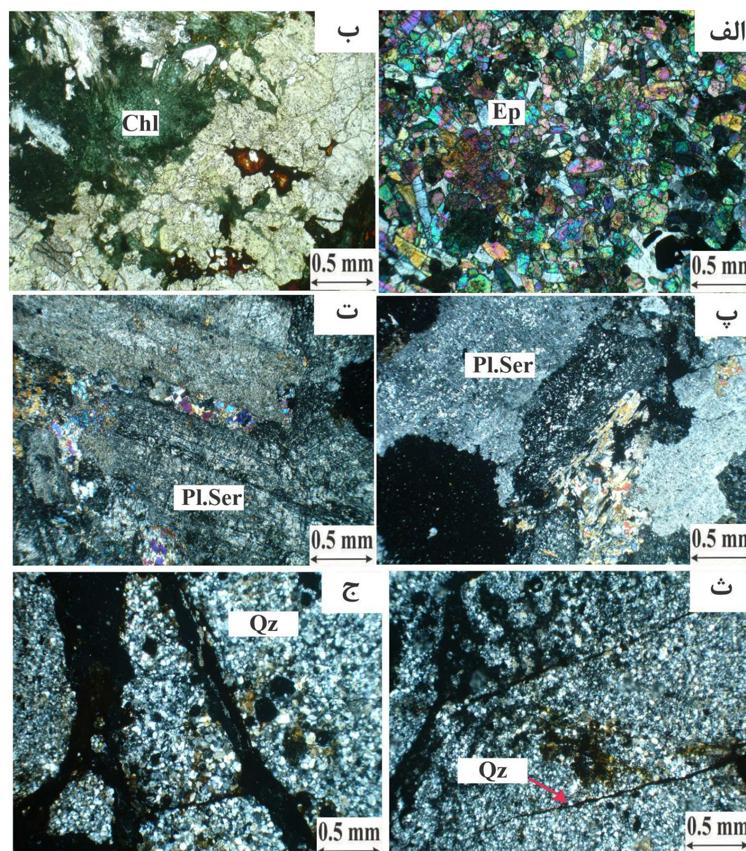
شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه زمین‌حسین [۱۵] که در آن، گسترش پهنه دگرسانی‌های پروپیلیتی، سریسیتی و رسی نسبت به سایر واحدهای سنگی نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

دگرسانی‌های همراه

واحدهای سنگی میزبان در منطقه زمین‌حسین (سنگ‌های آتشفشانی آندزیت، آندزی- بازالت و مواد آذرآواری ائوسن و سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی ائوسن) توسط سیال‌های گرمابی دگرسان شده و با تشکیل و گسترش یک سامانه دگرسانی بسیار گسترده همراه شده‌اند. دگرسانی‌های سریسیتی، رسی، سریسیتی- سیلیسی و پروپیلیتی در ارتباط با تزریق سیال‌های گرمابی مراحل اول (بیشتر ماگمایی) و دوم (ماگمایی- جوی) هستند که با تشکیل رگه-رگچه‌های شامل پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، هماتیت و گوتیت همراه شده‌اند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، دگرسانی چیره در منطقه زمین‌حسین از نوع پروپیلیتی هستند که پس از آن، دگرسانی رسی همراه با گسترش محدود دگرسانی‌های سریسیتی و سیلیسی اهمیت دارند. دگرسانی پروپیلیتی با گسترش فراوان دربردارنده کانه‌زایی مگنتیت در اغلب نمونه‌های سطحی و نیز در نمونه‌های مربوط به مغزه‌های حفاری دیده می‌شود. بررسی-های میکروسکوپی نشان داد که این دگرسانی ناشی از جانشینی کانی‌های فرومنیزین (بیوتیت و هورنبلند) با کانی‌های ثانویه اپیدوت، کلریت و کلسیت است (شکل‌های ۳ الف و ب). دگرسانی سریسیتی تنها درون توده نفوذی و در لبه دگرسانی رسی گسترش یافته است. این دگرسانی دربردارنده کانی‌های سریسیت، پیریت، کوارتز، کالکوپیریت و هماتیت است (شکل-های ۳پ و ت). در مناطقی که در معرض دگرسانی رسی قرار گرفته‌اند، فلدسپار به کانی‌های رسی تبدیل شده است. الگوهای XRD برای این نوع دگرسانی، حضور کانی‌های رسی (کائولینت، مونت‌موریلونیت و ایلیت)، آلبیت، هماتیت و کوارتز را نشان می‌دهد (جدول ۱). در این دگرسانی، کانی‌های رسی

به طور کامل و یا بخشی جانشین کانی‌های اولیه چون پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی شده‌اند. دگرسانی سیلیسی از دیگر دگرسانی‌ها در منطقه زمین‌حسین است که اغلب به تدریج به دگرسانی سریسیتی می رسد. این دگرسانی در اثر اضافه شدن سیلیس به سنگ توسط محلول‌های ماگمایی یا گرمابی و با بالا رفتن مقدار سیلیس به دلیل انحلال مواد دیگر سنگ و عوامل مهم و موثر در ته‌نشینی سیلیس (کاهش فشار، دما و pH محلول) به صورت کانی‌های اوپال، کوارتز و کالسدونی تشکیل شده است. این نوع دگرسانی به صورت رگه و رگچه‌های متعدد بر سنگ‌های آذرین نفوذی منطقه اثر داشته است (شکل‌های ۳ ث و ج).



شکل ۳ (الف و ب) تصویری از دگرسانی پروپیلیتی با حضور اپیدوت (Ep) و کلریت (Chl)، نور XPL. (پ و ت) درشت بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) که در اثر عملکرد فرآیندهای دگرسانی به سریسیت (Ser) تبدیل شده‌اند، (ث و ج) دگرسانی سیلیسی در زمینه ای ریز بلور از کانی‌های کوارتز (Qz). (Pl : پلاژیوکلاز، Ser : سریسیت، Qz : کوارتز، Pl.Ser : پلاژیوکلاز سریسیتی شده، Ep : اپیدوت و Chl : کلریت؛ [۱۶]) تصاویر در نور قطبیده متقاطع (xpl) تهیه شده‌اند.

جدول ۱ نتایج برآمده از الگوهای XRD نمونه های انتخابی از پهنه‌های دگرسانی ذخیره زمین‌حسین.

شماره نمونه	فاز های اصلی	فازهای فرعی
Zm-85	کوارتز، کائولینیت	آلبیت، مسکوویت- ایلیت، گوتیت، اورتوکلاز
Zm-87	کائولینیت، گوتیت	آلبیت، هماتیت، مسکوویت- ایلیت، کلسیت، کوارتز، اورتوکلاز
Zm-90	کائولینیت، گوتیت، هماتیت	آلبیت، کوارتز، کلسیت
Zm-92	کائولینیت، کوارتز	مونت‌موریلونیت، کلسیت
Zm-95	کائولینیت، گوتیت، هماتیت ، آلبیت	مسکوویت- ایلیت، کلسیت
Zm-99	کوارتز، کائولینیت گوتیت	آلبیت، جاروسیت، سنگ گچ
Zm-101	کائولینیت، گوتیت	کلسیت، مسکوویت - ایلیت، مونت‌موریلونیت

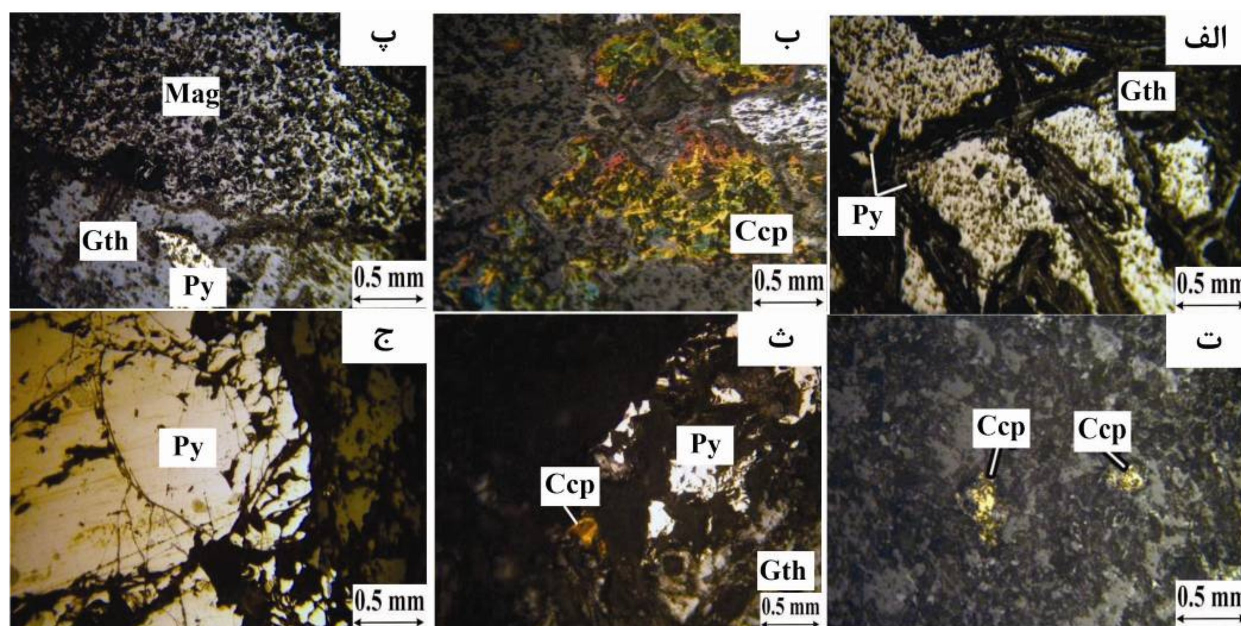
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

بررسی‌های میکروسکوپی

بررسی‌های کانه‌نگاری نشان داد که پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، هماتیت و گوتیت مهمترین کانه‌ها در رگه‌ها و رگچه‌های کانه‌زایی شده هستند (شکل ۴). کانه‌زایی در منطقه زمین‌حسین به صورت رگه-رگچه‌ای و درون شکستگی‌ها و درزه‌های سنگ میزبان با ترکیب آندزیتی- تراکی‌آندزیت که دستخوش دگرسانی سریسیتی- سیلیسی، رسی و پروپیلیتی شده اند، گسترش یافته است. مهم‌ترین کانه‌های درونزاد شامل کالکوپیریت، مگنتیت، پیریت و بورنیت هستند که با کانی‌های برونزادی چون مالاکیت و اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن (گوتیت، هماتیت، جاروسیت و لیمونیت) همراهی می‌شوند. کانی‌های یاد شده اغلب در پهنه‌های دگرسانی سریسیتی و رسی دیده می‌شوند. بر اساس بررسی رگه و رگچه‌های کانه‌زایی شده و روابط بین آنها، روند برای کانه‌سازی می‌توان سه مرحله در نظر گرفت. کوارتز مهم‌ترین کانی تشکیل شده در مرحله نخست است که به صورت توده ای و رگچه‌ای همراه با پیریت دیده می‌شود. در مرحله دوم، تشکیل پیریت با کالکوپیریت و بورنیت همراهی می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده، پیریت به صورت توده‌ای با فراوانی ۱۲-۱۰٪ تشکیل شده است. این کانه به طور عمده برشی شده و در هم رشدی با کالکوپیریت است (شکل ۴ ث). این کانه برشی شده (شکل ۴ ج) از لبه ها به هماتیت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۴پ). بافت گل کلمی بافت غالب این کانه است.

کالکوپیریت دیگر کانه سولفیدی درونزاد در منطقه زمین-حسین است که نسبت به پیریت فراوانی کمتری دارد و اغلب در درز و شکاف پیریت گسترش یافته است (شکل ۴ث). کوارتزهای مرحله سوم به صورت بلورهای درشت، شفاف و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند. در این مرحله، کمی پیریت تشکیل شده است. از مهم‌ترین کانی‌های برونزاد منطقه می‌توان به مالاکیت، آزوریت، گوتیت، هماتیت و لیمونیت اشاره کرد که در سطح گسترش یافته‌اند. به نظر می‌رسد که خنثی شدن محلول‌های اسیدی فرورو مس‌دار ناشی از اکسایش پیریت در اثر برخورد با رگه‌های کربناتی مسیر، سبب ترسیب مس به صورت کانی‌های کربناتی (مالاکیت و آزوریت) شده است. توالی پاراژنزی برای این تغییر و دگرگونی‌های کانیایی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴ (الف و ب) کانی‌سازی پیریت (Py) و کالکوپیریت (Ccp) در رگچه‌های کانه‌دار که در آن کالکوپیریت در اثر عملکرد فرآیندهای دگرسانی به گوتیت (Ght) تبدیل شده است. (پ و ت) کانی‌سازی پیریت (Py) همراه با کالکوپیریت و مگنتیت (Mag) در رگچه‌های کانه‌دار که در آن پیریت و کالکوپیریت در اثر دگرسانی به ترتیب به هماتیت و گوتیت تبدیل شده اند. ((ث و ج) کالکوپیریت همراه با پیریت (Py) و گوتیت (Ght) در رگچه‌های کانه‌دار. (Gth : گوتیت، Ccp : کالکوپیریت، Py : پیریت، Hem : هماتیت و Mag : مگنتیت؛ [۱۶]) تصاویر در نور بازتابی تهیه شده‌اند.

کانی	سنگ میزبان	کانی سازی درونزاد			کانی سازی برونزاد
		مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	
پلاژیوکلاز					
هورنبلند					
بیوتیت					
کوارتز					
سریسیت					
اپیدوت					
کلریت					
مگنتیت					
کالکوپیریت					
پیریت					
کلسیت					
دولومیت					
سیدریت					
آنکریت					
بورنیت					
مالاکیت- آزوریت					
هماتیت					
گوتیت					

شکل ۵ توالی پاراژنزی برای رگه-رگچه‌های کانه‌دار منطقه زمین‌حسین. ضخامت دوک‌ها بیانگر فراوانی کانی‌ها در رگه-رگچه‌هاست.

بررسی میانبارهای سیال

بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که کوارتز در رگه‌های کانه-دار در نمونه‌های سطحی و گمانه‌های اکتشافی همزاد با کانه-زایی سولفیدی بوده و برای بررسی میانبارهای سیال مناسب هستند. با توجه به بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده، ۶ نمونه دوبر صیقل شرایط مناسب برای ریزدماسنجی را داشتند. از اینرو، ۴۶ میانبار سیال ریزدماسنجی شدند. بررسی‌های سنگ-نگاری به منظور شناسایی انواع میانبارهای اولیه و ثانویه، رده-بندی زایشی، تهیه تصاویر مناسب و ریزدماسنجی انجام گردید.

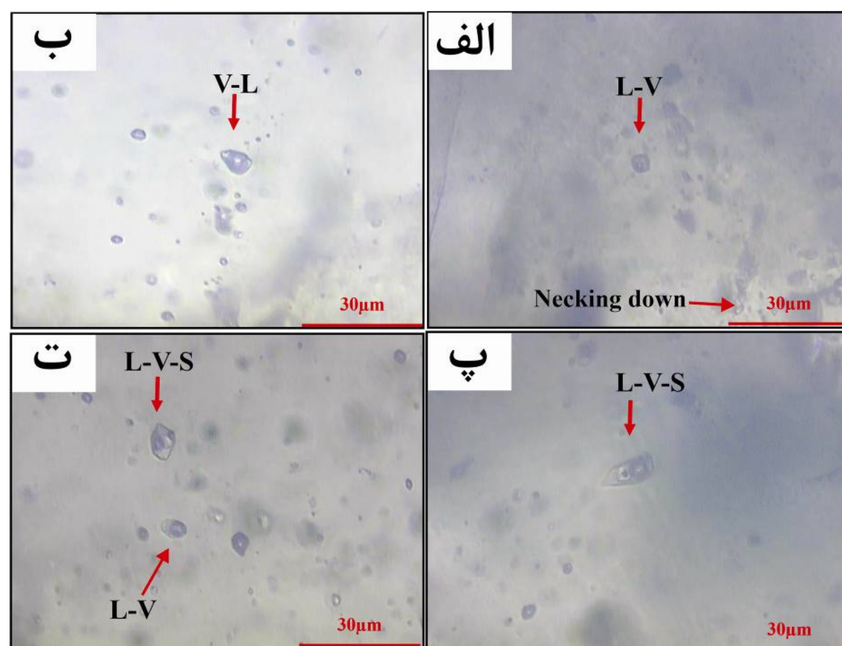
سنگ‌نگاری میانبارهای سیال: بررسی‌های انجام شده نشان داد که میانبارهای سیال در بلورهای کوارتز همزاد با رگه-رگچه های کانه‌دار از نوع اولیه و ثانویه هستند. اندازه میانبارها در نمونه‌ها از ۵ تا ۸۰ میکرومتر متغیر است و پدیده باریک شدگی در برخی از آنها دیده می‌شود (شکل ۶ الف). بر اساس عواملی چون اندازه بزرگ (شکل ۶ ب)، توزیع ناهمگن، نسبت‌های فازی مشابه و نبود آرایه خطی، میانبارهای سیال اولیه از ثانویه تفکیک شدند. بر اساس مقدار فازی، میانبارهای سیال اولیه در ذخیره زمین حسین به چهار نوع قابل تفکیک هستند که در ادامه بیان می شوند.

میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (نوع L-V): این نوع از میانبارهای سیال اغلب درجه پرشدگی ۷۰ تا ۸۰ درصد و گاهی بیش از ۸۰ درصد را نشان می‌دهند (شکل ۶ الف).

میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز (نوع V-L): این دسته از میانبارهای سیال شامل فازهای بخار و مایع هستند. در این نوع میانبارها، حباب گاز بیش از ۷۰ تا ۸۰ درصد فضای موجود را اشغال کرده است. از اینرو، این گروه از میانبارها به دلیل کوچک بودن (کمتر از ۵ میکرون) ریزدماسنجی نشدند.

میانبارهای سیال سه‌فازی هالیت دار (نوع L-V-S): این دسته از میانبارهای سیال با حضور فاز مایع، گاز و جامد مشخص می-شوند. درجه پرشدگی این میانبارها ۷۰ تا ۸۰ درصد است. هالیت با بلورهای مکعبی فاز نوزاد جامد با این نوع میانبارها همراه است (شکل‌های ۶ پ و ت).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از انواع میانبارهای سیال در بلور کوارتز. (الف و ب) شکل‌های کروی تا نامنظم میانبارهای سیال دو فـازی L-V و V-L برخی همراه با باریک‌شدگی، (پ و ت) میانبارهای سیال نوع سه فازی (L-V-S) همزاد با نوع دو فازی L-V.

میانبارهای سیال تک‌فاز گازی (V): این نوع از میانبارها به همراه میانبارهای نوع V-L و L-V-S در درون بلور میزبان حضور دارند و به رنگ سیاه دیده می‌شوند.

بررسی های ریزدماسنجی

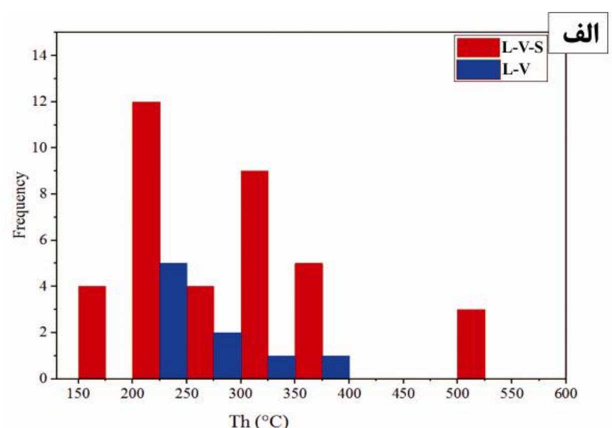
در این ریزدماسنجی، نخست عملیات سرمایش و سپس گرمایش برای میانبارهای سیال دوفازی اولیه (۴۶ نمونه) انجام شد. فرایند سرمایش برای تعیین مقدار شوری و نوع مواد محلول و فرایند گرمایش برای تعیین دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال انجام شد. نتایج بدست آمده از مرحله سرمایش نشان داد که آخرین دمای ذوب یخ (Tm_{ice}) برای میانبارهای L-V در گستره ۱- تا ۴- درجه سانتی‌گراد بوده که معادل با شوری‌هایی در گستره ۱٫۷۴ تا ۶٫۴۵ درصد معادل وزنی نمک طعام است (شکل ۷ب). دمای ذوب یخ (Tm_{ice}) هالیت (Tm_{NaCl}) برای میانبارهای نوع L-V-S در گستره ۱۹۰ تا ۴۷۳ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده که معادل شوری‌هایی در گستره ۳۱٫۳۹-۵۵٫۶۱ درصد معادل وزنی نمک طعام هستند (جدول ۲، شکل ۷ب). با توجه به گستره Te (۲۰- تا ۳۵- درجه سانتی‌گراد) می‌توان گفت که در سیال‌های کانه‌ساز، افزون بر NaCl، مقادیر بسیار کمی از نمک‌های محلول دیگر چون $FeCl_2$ و $MgCl_2$ نیز حضور دارند.

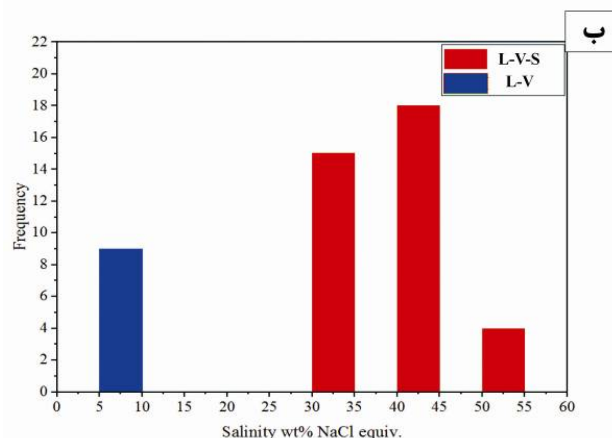
در مرحله گرمایش، اغلب میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع (L-V) به فاز مایع همگن می‌شوند و دمای همگن شدگی آنها در گستره ۳۵۹-۲۰۱ درجه سانتی‌گراد قرار دارد (شکل ۷ الف). از میانبارهای سیال سه فازی هالیت‌دار (L-V-S)، تعداد بیست میانبار با ناپدیدشدن فاز جامد (هالیت) همگن شده ($Th_{(L-V)}<Ts_{(NaCl)}$) و یازده میانبار با ناپدید شدن فاز بخار همگن گردیدند ($Th_{(L-V)}>Ts_{(NaCl)}$). بر اساس مقادیر $Ts_{(NaCl)}$ به دست آمده، شوری‌های تعیین شده [۱۷] برای این نوع میانبارها در گستره ۵۳-۳۵٪ قرار دارند (شکل ۷ب). بر اساس نتایج ریزدماسنجی، میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع (L-V) و سه فازی (L-V-S) از نظر دمای همگن شدگی و شوری دو جمعیت متفاوت را نشان می‌دهند. در واقع، میانبارهای سه فازی با شوری و دمای همگنی بالا، در روند تکاملی سیال‌های کانه‌دار دستخوش جوشش شده و به دام افتاده‌اند. همچنین، حضور میانبارهای دو فازی غنی از گاز (V-L) و تک فازی‌گازی (V) در کنار آنها خود می‌تواند دلیلی بر رخداد پدیده جوشش باشد. در این مرحله، سیال‌های کانه‌ساز به احتمال بسیار با خاستگاه ماگمایی و شوری اولیه حدود ۵ درصد وزنی نمک طعام، در اثر رخداد پدیده جوشش، شوری خود را افزایش داده و به بیش از ۵۰ درصد وزنی نمک طعام رسانده‌اند. از طرف دیگر، میانبارهای دو فازی غنی از مایع

(L-V) با شوری و دمای همگن شدگی به نسبت پایین می‌توانند نشان دهنده مرحله‌ای از کانه‌زایی باشند که طی آن سیال‌های کانه‌ساز به احتمال بسیار دچار سردشدگی معمول و آمیختگی با آب‌های زیرزمینی (دما و شوری پایین) شده‌اند.

جدول ۲ نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار ذخیره زمین‌حسین.

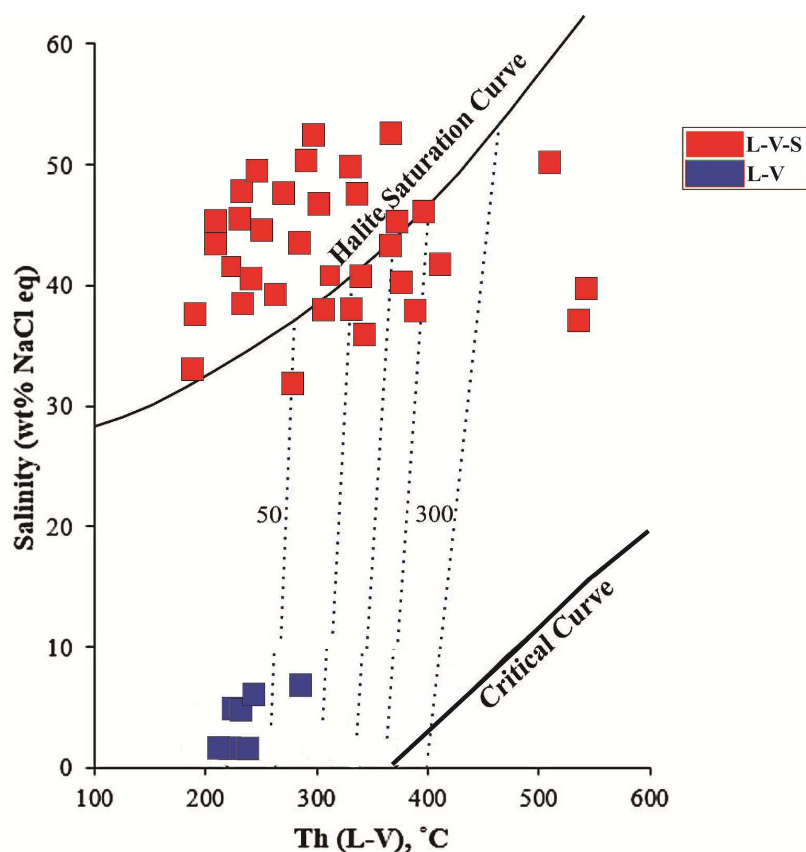
نمونه	کانی	نوع میانبار		$Th_{(L-V)}$ (°C)	$Ts_{(NaCl)}$ (°C)	Tm_{ice} (°C)	شوری (wt%NaCl eq.)
Zm1	کوارتز	اولیه	L-V (n =۲)	۲۴۵-۲۵۹	-	(-۴ تا -۲٫۳)	۳٫۸۷-۶٫۴۵
			L-V-S (n =۶)	۱۹۷-۵۰۰	۱۹۰-۳۸۱	-	۳۹٫۳۱-۴۵٫۱۲
Zm2	کوارتز	اولیه	L-V (n =۳)	۲۰۱-۲۰۴	-	(-۳٫۲ تا -۱)	۱٫۷۴-۵٫۲۶
			L-V-S (n =۶)	۱۷۰-۳۲۴	۲۲۷-۳۵۲	-	۳۳٫۲۹-۴۴٫۴۵
Zm3	کوارتز	اولیه	L-V (n =۰)	-	-	-	-
			L-V-S (n =۹)	۱۹۳-۳۵۰	۲۹۸-۴۷۳	-	۳۸٫۴۰-۵۵٫۶۱
Zm4	کوارتز	اولیه	L-V (n =۰)	-	-	-	-
			L-V-S (n =۲)	۲۸۰-۳۶۰	۳۰۰-۴۲۰	-	۳۸٫۱۲-۴۹٫۷۱
Zm5	کوارتز	اولیه	L-V (n =۴)	۲۴۱-۳۵۹	-	(-۳٫۲ تا -۲٫۳)	۳٫۸۷-۵٫۲۶
			L-V-S (n =۷)	۲۸۰-۵۲۰	۲۷۰-۴۳۰	-	۳۵٫۸۳-۵۰٫۶۵
Zm6	کوارتز	اولیه	L-V (n =۰)	-	-	-	-
			L-V-S (n =۷)	۲۲۶-۵۳۰	۲۷۰-۴۲۰	-	۳۵٫۹۵-۵۰٫۰۸



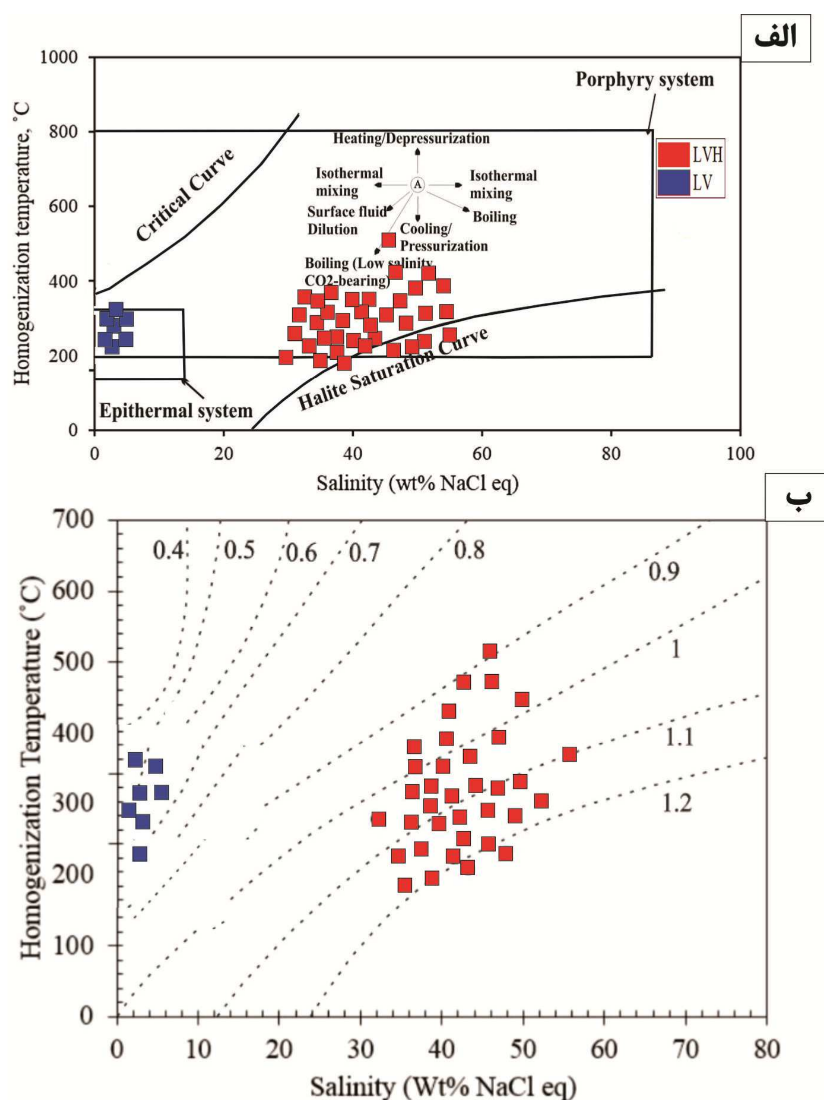


شکل ۷ (الف) نمودار ستونی توزیع فراوانی دمای همگن‌شدگی (L-V→L) و (ب) شوری میانبارهای سیال در رگه و رگچه‌های کوارتزی-سولفیدی-اکسیدی ذخیره زمین حسین.

برای مشاهده روند تکاملی سیال‌های کانه‌دار و تعیین مقدار فشار در زمان محبوس شدن، از نمودار دو متغیره شوری نسبت به دمای همگنی استفاده شد [۱۸] (شکل ۸). بر اساس این نمودار و نمودار دو متغیره شوری در برابر دمای همگنی برای ذخایر مختلف [۱۹، ۲۰] (شکل ۹ الف)، میانبارهای سیال مورد بررسی دو روند تقریباً خطی نسبت به محورهای دمای همگنی و شوری نشان می‌دهند که گویای رخداد پدیده جوشش و اثر فرآیندهای سرد شدن ساده و یا آمیختگی با سیال‌های با دما و شوری پایین هستند. این روند در سیال‌های کانه‌دار می‌تواند تا حدی مشابه شاخص‌های میانبارهای سیال در ذخایر مس پورفیری باشد. یافته‌های مربوط به میانبارهای سیال در منطقه زمین‌حسین تا حدی مشابه یافته‌های ریزدماسنجی گزارش شده از رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار ذخیره مس پورفیری سرچشمه رفسنجان (استان کرمان) [۹]، رگچه‌های کوارتزی کانسار بالوجه (استان آذربایجان‌شرقی) [۲۱]، رگچه‌های کوارتزی کانسار سارا (پرکام، استان کرمان) [۲۲]، رگچه‌های کوارتزی کانسار سونگون اهر (آذربایجان‌شرقی) [۲۳] و رگچه‌های کوارتزی کانسار میدوک شهر بابک (استان کرمان) [۲۴] هستند. بر اساس نمودار دو متغیره شوری نسبت به دمای همگنی [۱۸، ۱۹]، برخی از میانبارهای سیال سه فازی شامل فاز جامد هالیت در بالای منحنی اشباع از نمک قرار دارند (شکل‌های ۸ و ۹ الف). این ممکن است در اثر بدام افتادن ناهمگن بلورهای بسیار ریز هالیت به همراه سیال در حال جوشش و اشباع از NaCl باشد [۲۰]. با توجه به شوری میانبارهای سیال، می‌توان گفت که به احتمال بسیار کمپلکس‌های کلریدی عامل مهم و اصلی انتقال فلزات در سیال‌های گرمابی کانی‌ساز بوده‌اند.



شکل ۸ الگوی توزیع مقادیر شوری نسبت به دمای همگنی اندازه‌گیری شده برای میانبارهای سیال بررسی شده در ذخیره زمین‌حسین در مقایسه با منحنی اشباع از نمک و منحنی بحرانی [۱۸]. خطوط نقطه‌چین بیانگر فشار بخارهای سیال دربردارنده NaCl در دماها و شوری‌های مختلف هستند [۱۹].



شکل ۹ (الف) نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری برای میانبارهای سیال در ذخایر مختلف [۲۰،۱۹] که در آن، یافته‌های ریز دماسنجی رگه-رگچه‌های کانه‌دار زمین‌حسین در گستره ذخایر فراگرمایی و پورفیری قرار دارند. (ب) توزیع فراوانی داده‌های میانبارهای سیال مورد بررسی در نمودار دو متغیره دمای همگنی نسبت به شوری همراه با تغییرات چگالی.

برآورد عمق، فشار و چگالی میانبارهای سیال

فرآیند جوشش زمانی که فشار محیط بیشتر باشد و در عمل هنگامی که فشار سنگ ایستایی تبدیل به فشار هیدروستاتیک شود رخ دهد. این امر باعث کاهش سریع فشار دربرگیرنده سیال‌های گرمابی می‌شود. در واقع، جوشش سیال‌های گرمابی یک ساز و کار و فرآیند اولیه برای تحرک و تمرکز فلزات هنگام تشکیل کانسارهای فلزی است. وقتی در یک سیال گرمابی کانه‌ساز، پدیده جوشش از عوامل موثر در ته‌نشست فلزات باشد، می‌توان دمای همگنی را معادل دمای به دام افتادن در نظر گرفت؛ در این حالت، دیگر نیازی به تصحیح فشار نیست [۲۵]. بر اساس نمودار دو متغیره دمای همگن شدگی نسبت به شوری [۱۸] (شکل ۸)، می‌توان گفت که سیال‌های کانه‌ساز در دماهای حدود ۵۲۰ درجه سانتیگراد شروع به جوشش کرده و تا دماهای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد از NaCl اشباع نشده ولی پایین‌تر از ۳۸۰ درجه سانتیگراد به حد اشباع رسیده‌اند. در این حالت، سیال کانه ساز فشار هیدرواستاتیک حدود ۲۵۰ بار

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

را تجربه می‌کرده‌اند که معادل عمق حدود ۲۳۰۰ متری از زیر سطح سفره آبهای زیر زمینی بوده است. در واقع، در دمای کمتر از ۳۸۰ درجه سانتیگراد برخی بلورهای ریز هالیت نیز به صورت فاز جامد و ناهمگن بهمراه سیال‌های کانه‌ساز درون بلور میزبان به دام افتاده‌اند (شکل ۸). این عمق کانه‌زایی در ذخیره زمین‌حسین مشابه بسیاری از ذخایر مس پورفیری در دنیاست [۱۹]. همچنین، بر اساس نمودار دو متغیره شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی (شکل ۹ب) [۲۶]، چگالی سیال‌های مسئول کانی‌سازی در ذخیره زمین‌حسین در گستره ۰٫۵ تا ۱٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. چگالی‌های حدود ۱٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب مربوط به میانبارهای سیال سه‌فازی دربردارنده بلورهای نوزاد هالیت هستند.

برداشت

مهم‌ترین نتایج برآمده از بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ-نگاری، کانه‌نگاری و ریزدماسنجی میانبارهای سیال ذخیره زمین‌حسین عبارتند از:

۱- کانه‌زایی رگه- رگچه‌های درون سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت، آندزی‌بازالت و مواد آذرآواری) و توده‌های آذرین درونی (گرانودیورت و گرانیت) ائوسن به دو صورت درونزاد (کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت) و برونزاد (مالاکیت، آزوریت، هماتیت، گوتیت، جاروسیت، لیمونیت) رخ داده است.

۲- گسترش دگرسانی‌های پروپیلیتی، رسی، سریسیتی-سیلیسی، حضور میانبارهای سیال غنی از مایع، غنی از گاز و غنی از مایع شامل فاز جامد به صورت همزاد و شوری بالای برخی از میانبارهای سیال بررسی شده نشان داد که سیال‌های کانه‌ساز ماهیت ماگمایی و ماگمایی- جوی دارند.

۳- بررسی میانبارهای سیال و یافته‌های بدست آمده از ریزدماسنجی نشان داد که رخداد پدیده‌هایی چون جوشش، آمیختگی و سرد شدن معمولی مهمترین عوامل اثرگذار در نهشت فلزات طی گسترش رگه- رگچه‌های کانه‌زایی هستند.

۴- با توجه به شوری بالای برخی از میانبارهای سیال به نظر می‌رسد که کمپلکس‌های کلریدی مهم‌ترین عامل در انتقال فلزات در سیال‌های گرمابی هستند. افزون بر این، سیال‌های گرمابی شامل مقادیر بسیار کمی از نمک‌های محلول دیگر چون $FeCl_2$ و $MgCl_2$ هستند.

۵- بر اساس نتایج این پژوهش، ذخیره مس زمین‌حسین از نظر ساز و کار تشکیل، گسترش و روند تکامل بیشترین شباهت را به سامانه های پورفیری دارد.

۶- نتایج بدست آمده از میانبارهای سیال رگه-رگچه‌های کوارتز- سولفید- اکسید منطقه زمین‌حسین شباهت بسیاری به یافته‌های ریزدماسنجی گزارش شده از رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار ذخایر مس پورفیری شناخته شده در کشور چون سرچشمه، بالوجه، سارا (پرکام)، سونگون و میدوک دارند.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند که به این وسیله سپاس و قدردانی خود را از مسئولین آن اعلام می‌دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Stocklin J., "*Structural history and tectonics of Iran: A review*", Bulletin-American Association of Petroleum Geologists 52 (1985) 1258-1299.

[2] Ghorbani M., "*The economic geology in Iran: Mineral deposits and natural resources*", Springer Science Business Media Dordrecht (2013) 1-581.

[3] Shafiei B., *"Two distinct occurrences in Palaeogene magmatic of Cenozoic magmatic arc of the Kerman: Geochemical characteristics and rock-forming processes"*, Journal of Sciences, University of Tehran 36 (2010) 137-156 (in Persian).

[4] Salehi Tinooni M., Abedini A., Calagari A. A., "*Investigation of mineralization, REE geochemistry, and fluid inclusions sudies of the*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.6.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.75]

[12] Nedimovic R., *"Eploration for ore deposits in Kerman region"*, Geological Survey of Iran, Report No.53 (1973) 274p.

[13] Khaleghi M., Abedini A., Ranjbar, H., Calagari A. A., *"Synergetic use of the Sentinel-2, Aster, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale"*, Acta Geodynamica et Geomaterialia 17 (2020) 311-328.

[14] Khaleghi M., Abedini A., Ranjbar, H., Calagari A. A., *"Mineralogy and trace elements geochemistry of argillic alteration zone: the Zamin Hossein district, Kerman Province, SE Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28 (2020) 933-948 (in Persian).

[15] Djokovic I., Cvetic S., Dimitrijevic M. D., "*Geological Map of Dehaj*", In Geological Survey of Iran Map Series 6951, Scale 1:100000.

[16] Whitney D. L., Evans B. W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[17] Bodnar R. J., *"Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl soulations"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 57 (1993) 683-684.

[18] Ahmad S. N., Rose A. W., *"Fluid inclusion in porphyry and skarn ore at New Miexico"*, Economic Geology 75 (1980) 229-250.

[19] Roedder E., *"Fluid inclusion"*, Mineralogy Society of America, Review in mineralogy 12 (1984) 1-644.

[20] Hajalilou B., Aghazadeh M., *"Fluid inclusion studies on quartz veinlets at the Ali Javad porphyry copper-gold deposit, Arasbaran, Northwestern Iran"*, Journal of Geoscience and Environment Protection 4 (2016) 80-91.

[21] Hosseinzadeh M. R., Moayyed M., Maghfouri S., Alipour S., Hajalilou B., *"Geology, alteration, mineralization and fluid inclusion studies of Baloojeh deposit; Typical Cu-Mo porphyry deposit in Arasbaran Magmatic Zone"*, Iranian Scientific Quarterly Journal, Geosciences 95 (2015) 295-306 (in Persian).

Shalang vein-type polymetallic ore deposit, southwest of Kerman", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 767-780 (in Persian).

[5] Atapour H., Aftabi A., "*Geochemistry and metallogeny of calc-alkaline, shoshonitic and adakitic igneous rocks associated with porphyry Cu-Mo and vein-type deposits of Dehaj-Sarduieh volcanoplutonic belt, Kerman*", Iranian Scientific Quarterly Journal, Geosciences 18 (2009) 161-172 (in Persian).

[6] Salehi Tinooni M., Abedini A., Calagari A. A., *"Type of mineralization and studies of fluid inclusions of the Bolboli2 copper ore deposit, northeast of Sirjan, SE Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28 (2020) 329-340 (in Persian).

[7] Atapour H., *"Petrography and geochemistry of shoshonites of Ghode-e-Biabani area of the Bardsir"*, MSc Thesis, University of Shahid Bahonar, Kerman, Iran (1993) 1-294 (in Persian).

[8] Aftabi A., Atapour H., *"Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran"*, Episodes 23 (2000) 119- 125.

[9] Maani Joe M., Mostaghimi M., Abdollahi Risse M., Sepahi A. A., *"Systematic studies of stable sulfur isotopes and fluids involved in different vein groups of Sarcheshmeh Porphyry copper deposit, based on new data"*, Iranian Journal of Economic Geology 4 (2013) 217-239.

[10] Hosseini M., Ghaderi M., Ghaderi M., Alirezaei S., *"Types of vein-veinlet systems and their relationship with mineralization in the Takht-e-Gonbad ore deposit, northeast of Sirjan"*, 15th Symposium of Iranian Geological Association, Teacher Training University of Tehran (2011).

[11] Salehi Tinooni M., Abedini A., Calagari A. A., "*Investigation of mineralization, alteration, and fluid inclusions of the Takht-e-Gonbad copper deposit (northeast of Sirjan, SE Iran)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 29 (2021) 35-48 (in Persian).

and tectono magmatic setting of Meiduk porphyry copper deposit, Shahrebabak-Kerman", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012) 441-454.

[25] Shapherd T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., *"A practical guide to fluid inclusion studies",* Blackie, Glasgow (1985) 1-239.

[26] Roedder E., Bodnar R. J., *"Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies",* Earth and Planetary Science Letters 8 (1980) 263-301.

[22] Mohammadi Nickname H., Taghipour N., *"Physico-chemical evolution of hydrothermal fluid in Sara porphyry copper deposit (Perkam), Kerman province"*, Iranian Journal of Advanced Applied Geology 1 (2011) 11-24.

[23] Calagari A. A., *"Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran",* Journal of Asian Earth Sciences 23 (2004) 179-189.

[24] Alirezaei A., Aliyani F., Moradian., "*The study of petrography, geochemical characteristics*